Technical Note

Public Works Canada | Travaux publics Canada

Solar Programs Office (613) 998-9817

No. 26: October 1984

Effect of Uneven Flow on Collector Array Efficiency

1. SYNOPSIS

The cumulative pressure drop in the supply and return headers of a solar collector array causes uneven distribution of the thermal fluid among the collectors. While the flow through the outer collectors of a reverse return array is only slightly affected, the centre collectors receive the lowest flow. This effect increases as the number of collectors in the array is increased. Array efficiency is 3 to 10% less than collector efficiency, depending on the degree of the flow imbalance. Direct return headers cause a greater loss in collector array efficiency than does reverse return distribution.

In using computer simulation programs to predict the thermal performance of medium and large arrays, collector input parameters should be corrected to account for uneven flow. This note details the calculation of input parameters and correction factors for a hypothetical six-collector array.

2. INTRODUCTION

Most liquid flat plate collectors have internal manifolds to reduce exterior piping. When collectors are plumbed for reverse return, a flow imbalance occurs in these manifolds resulting in reduced flow, particularly in the centre collectors of an array.

A parallel can be drawn with electrical circuits, in which the voltage drop is highest at the point farthest from the power source. In a solar system, the pump is analogous to the power source. The supply and return headers of the array are connected to the pump output and input respectively. Since the centre collectors are the farthest from the pump, they receive the lowest flow.

The magnitude of the flow imbalance is directly affected by the following factors:

* the number of collectors in the array
* the overall flow rate in the array

A flow imbalance in the collectors reduces the thermal performance of the system. Therefore, when using computer simulation techniques to estimate solar energy contribution, correction factors must be applied to the collector input parameters. Correction factors can be calculated once the pressure distribution in the array and the collector flow rates are known.

In this note calculations are based on a hypothetical six-collector array for which the heat transfer fluid is water. The collector input parameters are as follows:

nominal header diameter	= 25 mm
length of headers	= 1200 mm
flow rate	= 0.063 kg/s
pressure drop across collector at the given flow rate	= 0.380 kPa

3. PRESSURE DISTRIBUTION IN COLLECTOR ARRAYS

3.1 Calculation of Pressure Drops Based on Equal Collector Flow

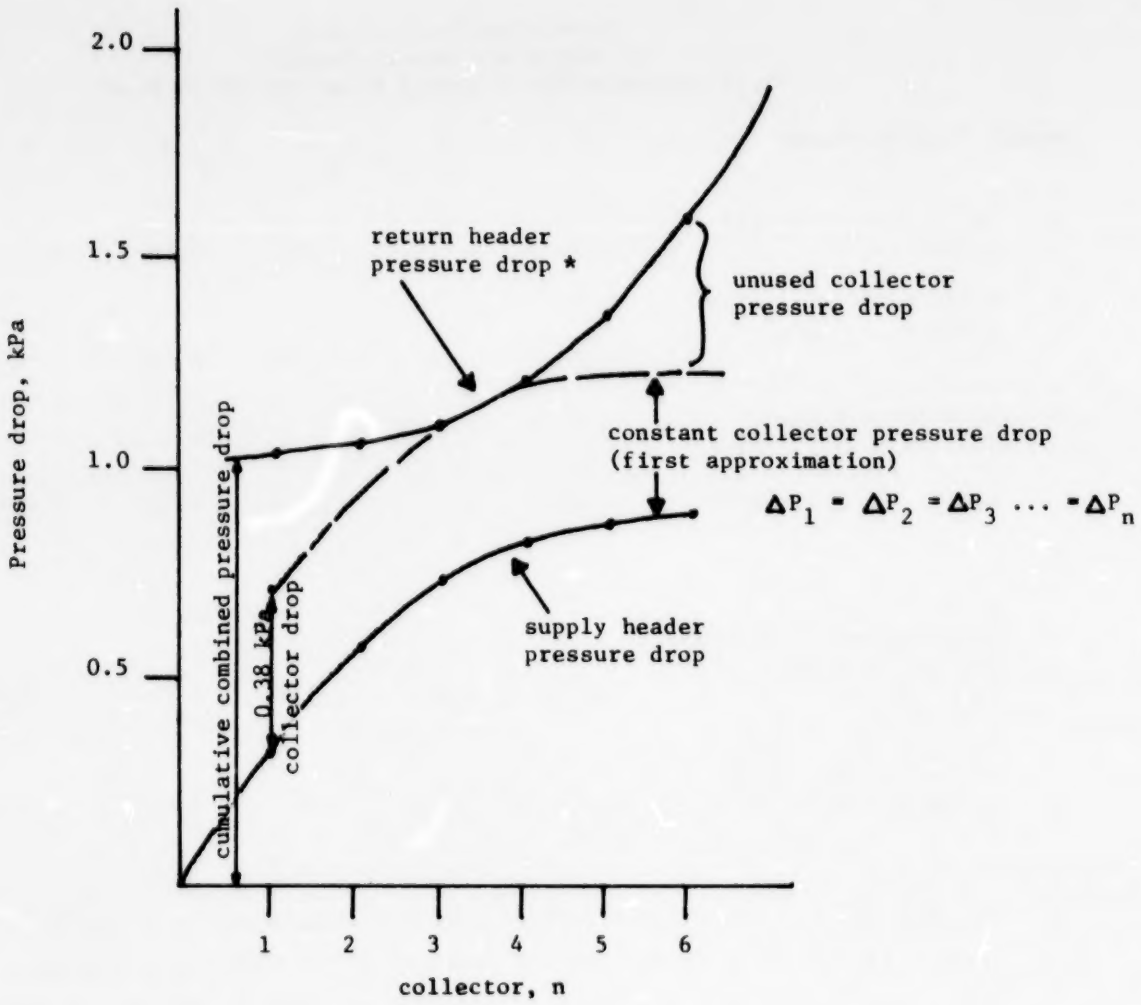
As a first approximation in calculating the cumulative pressure drop along the supply and return headers of an array, it is assumed that the collectors carry equal flow. The theoretical pressure drop at each header section in the array is calculated in a five-step procedure (see Table 1).

TABLE 1

Calculated Pressure Drop in Supply and Return Headers First Approximation Assuming Equal Collector Flow

Header Section Number		1	2	3	4	5	6
1.	Water flow in supply header (kg/s)	0.378	0.315	0.252	0.189	0.126	0.063
2.	Pressure drop in each section, X_J (kPa) (ref. 1)	0.345	0.248	0.166	0.097	0.048	0.014
3.	Cumulative pressure drop in supply header $X_i = \sum_{J=i}^{J=i} X_J$, (kPa)	0.345	0.593	0.759	0.856	0.904	0.918
4.	Cumulative combined pressure drop in supply header, collector and return header (kPa) (see Fig. 2)	1.077	1.091	1.139	1.236	1.402	1.650
5.	Pressure drop across collector, ΔP_n (kPa) (item #4 - item #3)	0.732	0.498	0.380	0.380	0.498	0.732

Figure 1 illustrates the theoretical pressure drop profiles of the supply and return headers of the array as well as the pressure drop across the collectors, assuming equal collector flow. The unused pressure drop shown in the figure does not occur in practice since the actual flow is unevenly distributed. This unused pressure drop can be thought of as the component that causes the diversion of the flow from the middle to the outer collectors. The difference in pressure between the supply and return headers at each header section, i.e. the effective collector pressure drop, governs the flow in each collector.



* return header pressure drops are identical to the supply header pressure drops, except reversed and shifted by a constant value

Figure 1: Pressure drop profiles assuming equal flow distribution in a six-collector array

3.2 Calculation of Actual Collector Flow

The actual collector flow rates in the array are calculated using an iterative procedure that involves the sequential calculation of items 1 to 5 in Table 2. The calculated pressure drop (item 5) of one iteration is used as the starting value (item 1) for the next iteration. The process is continued until the calculations converge.

For the six-collector example, the process converges after two to three iterations. The revised collector flow rates are shown in Table 2.

TABLE 2

Corrections to Pressure Drop to Account for Uneven Collector Flow

Header Section Number	1	2	3	4	5	6	Notes
1. Uncorrected pressure drop across collectors, ΔP_n (kPa) (ref. Table 1)	0.732	0.498	0.380	0.380	0.498	0.732	P_m = 0.537
2. $\sqrt{\frac{\Delta P_n}{\Delta P_m}}$	1.17	0.96	0.84	0.84	0.96	1.17	total=5.94
3. Normalized mass flow*	1.18	0.97	0.85	0.85	0.97	1.18	total=6.00
4. Mass flow rate in the collector (kg/s) (item #3 x 0.063)	0.074	0.061	0.054	0.054	0.061	0.074	total=0.378
5. Corrected pressure drop across collectors, (kPa)	0.524	0.356	0.279	0.279	0.356	0.524	

where P_m = mean pressure drop across collectors
ΔP_n = pressure drop across collector "n"
n = collector number

---

* The mass flow must be normalized to the number of collectors in the array.

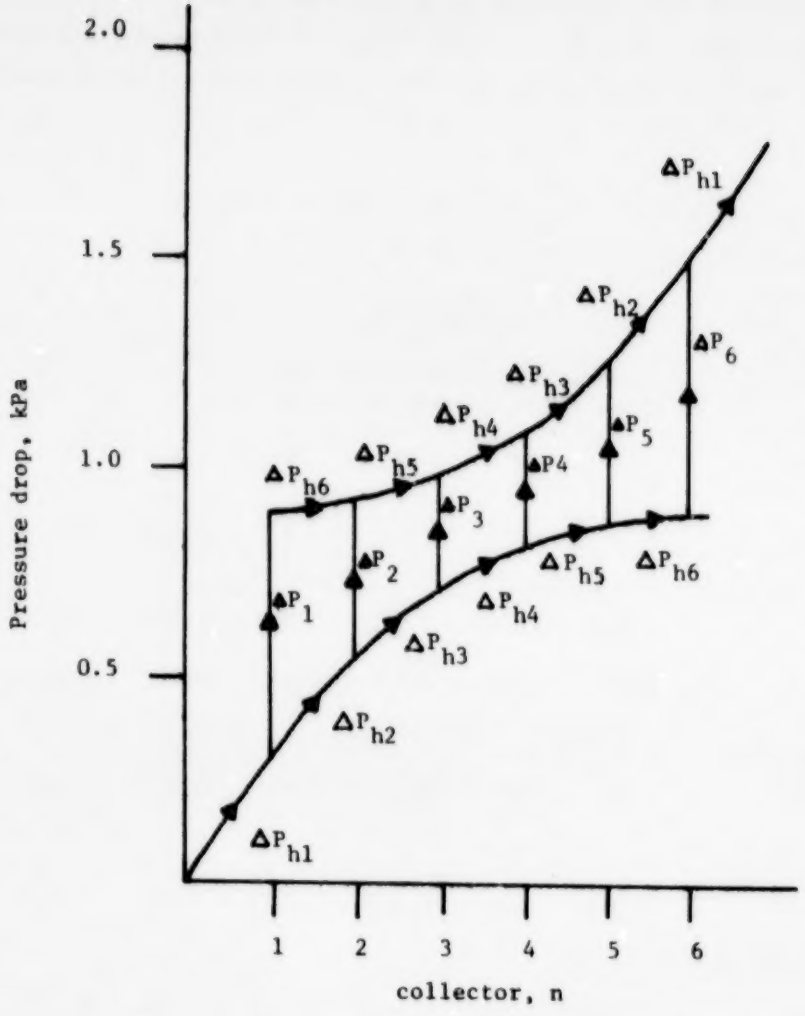


Figure 2: Pressure drop profiles after correction to account for the uneven flow in a six-collector array

3.3 Pressure Profiles of the Supply and Return Headers

Using the mass flow rate in the collectors given in Table 2, the mass flow rate in each section of the header is calculated. The new header pressure drops are obtained using standard pressure/flow tables. A summary of the calculations is given in Table 3.

TABLE 3

Pressure Loss in Supply Header Due to Uneven Collector Flow

Header Section Number	1	2	3	4	5	6
1. Flow rate in supply header (kg/s)	0.378	0.304	0.243	0.189	0.135	0.074
2. Pressure drop in supply header, ΔP_n (kPa)	0.345	0.233	0.156	0.097	0.055	0.020

The pressure drop in the return header is identical to that in the supply header; however, the profiles are reversed. Figure 2 shows the corrected pressure profiles of the supply and return headers.

3.4 Flow Pattern for Direct and Reverse Return Arrays

While reverse return distribution is more common, headers can also be connected for direct return (see Figure 3). The flow profiles under both conditions are illustrated in Figure 4. When the six-collector array is connected for reverse return, the outer two collectors take 40% of the total flow, while the inner four collectors take the remaining 60%. In an array of twenty collectors the flow imbalance is much greater; the outer eight collectors take 75% of the total flow, and the centre twelve collectors take only 25%.

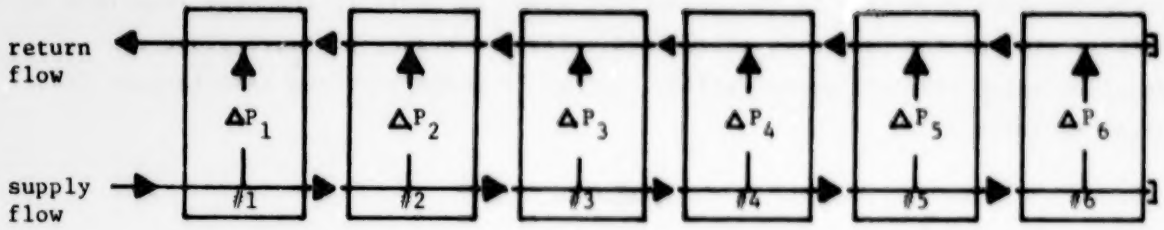


Figure 3(a): Collectors connected in parallel in a direct return array

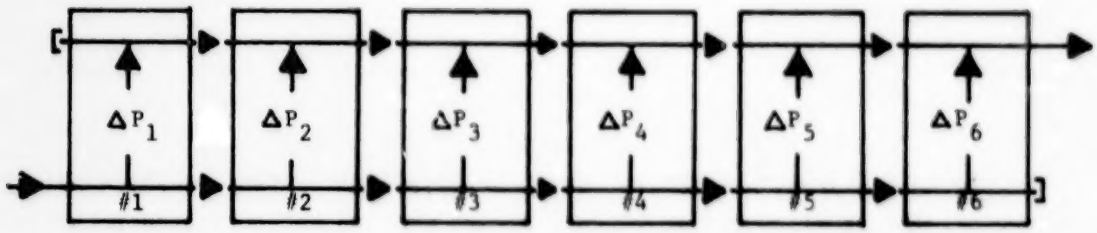


Figure 3(b): Collectors connected in parallel in a reverse return array

Direct return is not recommended since it increases the magnitude of the flow imbalance. In this type of connection the collector nearest to the solar pump experiences a small pressure drop, while the collector farthest from the pump is exposed to a large pressure drop. In reverse return connections the collector pressure drops and the flow pattern are more balanced. Collector arrays are subject to flow imbalances whether the collectors are connected in series or in parellel.

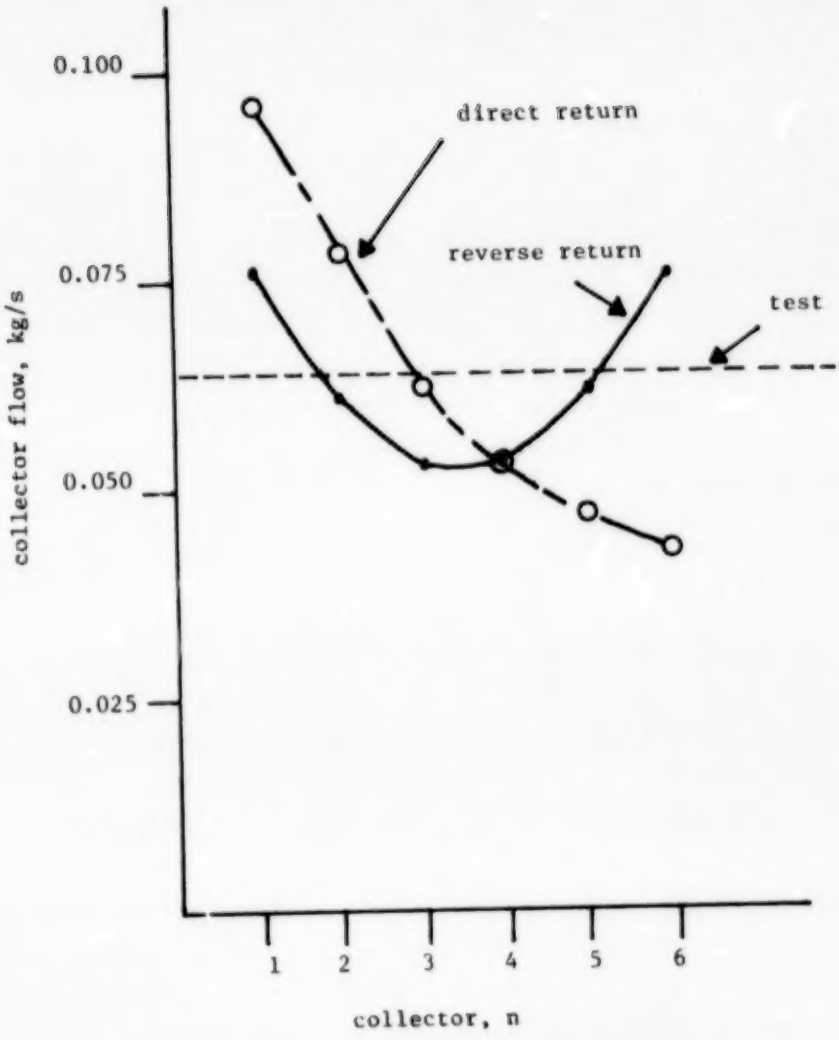


Figure 4: Flow pattern for direct and reverse return in a six-collector array

4. ARRAY HEAT REMOVAL FACTOR

The useful energy gain of a collector is expressed as follows (ref. 2):

$$F_r = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L F'} \left[1 - \exp\left(\frac{-A_c U_L F'}{\dot{m}C_p} \right) \right]$$

$$= \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L F'} \left[1 - F'' \right]$$

where F_r = collector heat removal factor
$\dot{m}$ = mass flow rate, kg/s
C_p = specific heat of thermal fluid, J/kg.°C
A_c = collector area, m^2
U_L = collector energy loss coefficient, $W/m^2.°C$
F' = collector efficiency factor
F'' = $\exp \frac{(-A_c U_L F')}{\dot{m}C_p}$

The collector parameters used in the six-collector array example are as follows:

$\dot{m}$	= 0.063 kg/s	$F_r\tau\alpha$	= 0.731
A_c	= 3.0 m^2	F_r	= 0.865
F'	= 0.888	$F_r U_L$	= 4.59 $W/m^2.°C$

where τ and α are the transmissivity and absorptivity of the solar absorber respectively.

Heat removal correction factors are calculated for each collector in the six-collector array using the actual mass flow rate given in Table 2. A summary of the calculations is provided in Table 4.

TABLE 4

Heat Removal Factors, F_r, for a Six-Collector Array

Collector Number	Flow Rate (kg/s)	$\dot{m}C_p/A_cU_LF'$	F"	F_r
1 and 6	0.076	22.50	0.979	0.869
2 and 5	0.061	18.06	0.973	0.864
3 and 4	0.052	15.39	0.968	0.859

The average of the heat removal factors listed in Table 4 is 0.864.

5. ARRAY EFFICIENCY

Once the collector flow rates are calculated and the heat removal factors are known, the efficiency curve of each collector in the six-collector array can be determined. Technical Note #2 provides graphs from which a correction factor, Fa, can be obtained (ref. 5).. Some representative correction factors for the collector type under consideration are listed below:

Array Size (no of collectors)	Correction Factor (Fa)
2	.99
6	.98
10	.93
20	.85

Collector performance is described by values for $F_r\tau\alpha$ and F_rU_L provided by the National Solar Test Facility. These values are multiplied by the correction factor (Fa) to give the array performance. For average-sized arrays of 8 to 16 collectors, array efficiency is approximately 3 to 10% less than collector efficiency.

6. CONCLUSION

The performance of a collector array is affected by the number of collectors in the array and the flow pathway. Collector flow distribution can be determined using the procedures outlined for a six-collector array. Based on the typical flat plate collectors described in the note, correction factors were given for arrays of 2 to 20 collectors. Using correction factors in computer simulations helps provide more accurate estimates of solar energy contribution, especially in large solar systems.

7. REFERENCES

1. ASHRAE Handbook of Fundamentals, "Pipe Sizing", Chapter 34.13, 1981.

2. Duffie, J.A., and Beckman, W.A., "Solar Energy Thermal Processes", John Wiley and Sons, New York, 1974.

3. Hooper and Angus Associates Ltd., contract #330-334-7, Solar Programs Office, 1984.

4. Dunkle, R.V., and Davey, E.T., "Flow Distribution in Absorber Banks", paper presented at Melbourne International Solar Energy Society Conference, 1970.

5. Technical Note #2, "Adjustment of Thermal Performance Curves for Variations in Flow Rate and Fluid Characteristics of Solar Collectors", Solar Programs Office, Public Works Canada, June 1982.

Guide technique

Travaux publics Canada | Public Works Canada

Bureau des programmes solaires (613) 998-9817

N° 26: octobre 1984

Effet de la distribution irrégulière de l'écoulement sur le rendement d'une batterie de capteurs

1. RÉSUMÉ

La chute de pression cumulative dans les collecteurs d'alimentation et de retour d'une batterie de capteurs produit une distribution irrégulière du fluide caloporteur dans les capteurs. Le débit dans les capteurs externes d'une batterie à retour inversé ne varie que légèrement. C'est dans les capteurs du centre qu'il est le plus faible. Cet effet est d'autant plus marqué que le nombre de capteurs est grand. Le rendement d'une batterie est de 3 à 10% inférieur à celui d'un capteur, selon le degré de déséquilibre de l'écoulement. Les collecteurs à retour direct produisent une plus grande diminution du rendement de la batterie que les collecteurs à retour inversé.

Lorsqu'on utilise les programmes de simulation sur ordinateur pour prévoir le rendement thermique des batteries de moyenne et grande tailles, il faut corriger les paramètres d'entrée des capteurs pour tenir compte de la distribution irrégulière de l'écoulement. Le présent guide décrit en détails le calcul des paramètres d'entrée et des facteurs de correction applicables à une batterie hypothétique de six capteurs.

2. INTRODUCTION

La plupart des capteurs plans à liquide comprennent des collecteurs internes, ce qui permet de réduire la tuyauterie extérieure. Lorsque la tuyauterie des capteurs est agencée de façon que le retour soit inversé, il se produit un déséquilibre de l'écoulement dans ces collecteurs, qui se traduit par une réduction du débit, particulièrement dans les capteurs du centre d'une batterie.

On peut faire un parallèle avec un circuit électrique, dans lequel la chute de tension est maximale au point le plus éloigné de la source. Dans un système solaire, la pompe joue un rôle analogue à la source d'énergie électrique. Le collecteur d'alimentation et le collecteur de retour de la batterie sont reliés respectivement à la sortie et à l'entrée de la pompe. Étant donné que les capteurs du centre sont les plus éloignés de la pompe, ils présentent le débit le plus faible.

La grandeur du déséquilibre d'écoulement dépend directement des facteurs suivants:

* nombre de capteurs de la batterie
* débit global de la batterie

Un déséquilibre de l'écoulement dans les capteurs réduit le rendement thermique du système. Par conséquent, lorsqu'on utilise les techniques de simulation sur ordinateur pour évaluer l'apport de l'énergie solaire, il faut appliquer des facteurs de correction aux paramètres d'entrée des capteurs. On peut calculer les facteurs de correction une fois qu'on connaît la distribution de pression dans la batterie et les débits dans les capteurs.

Dans le présent guide, les calculs sont établis en fonction d'une batterie hypothétique de six capteurs dans laquelle le fluide caloporteurs est de l'eau. Les paramètres d'entrée des capteurs sont:

diamètre de collecteur nominal	= 25 mm
longueur des collecteurs	= 1200 mm
débit	= 0.063 kg/s
chute de pression dans le capteur au débit considéré	= 0.380 kPa

3. DISTRIBUTION DE PRESSION DANS LES BATTERIES DE CAPTEURS

3.1 Calcul des chutes de pression basé sur un débit uniforme dans les capteurs

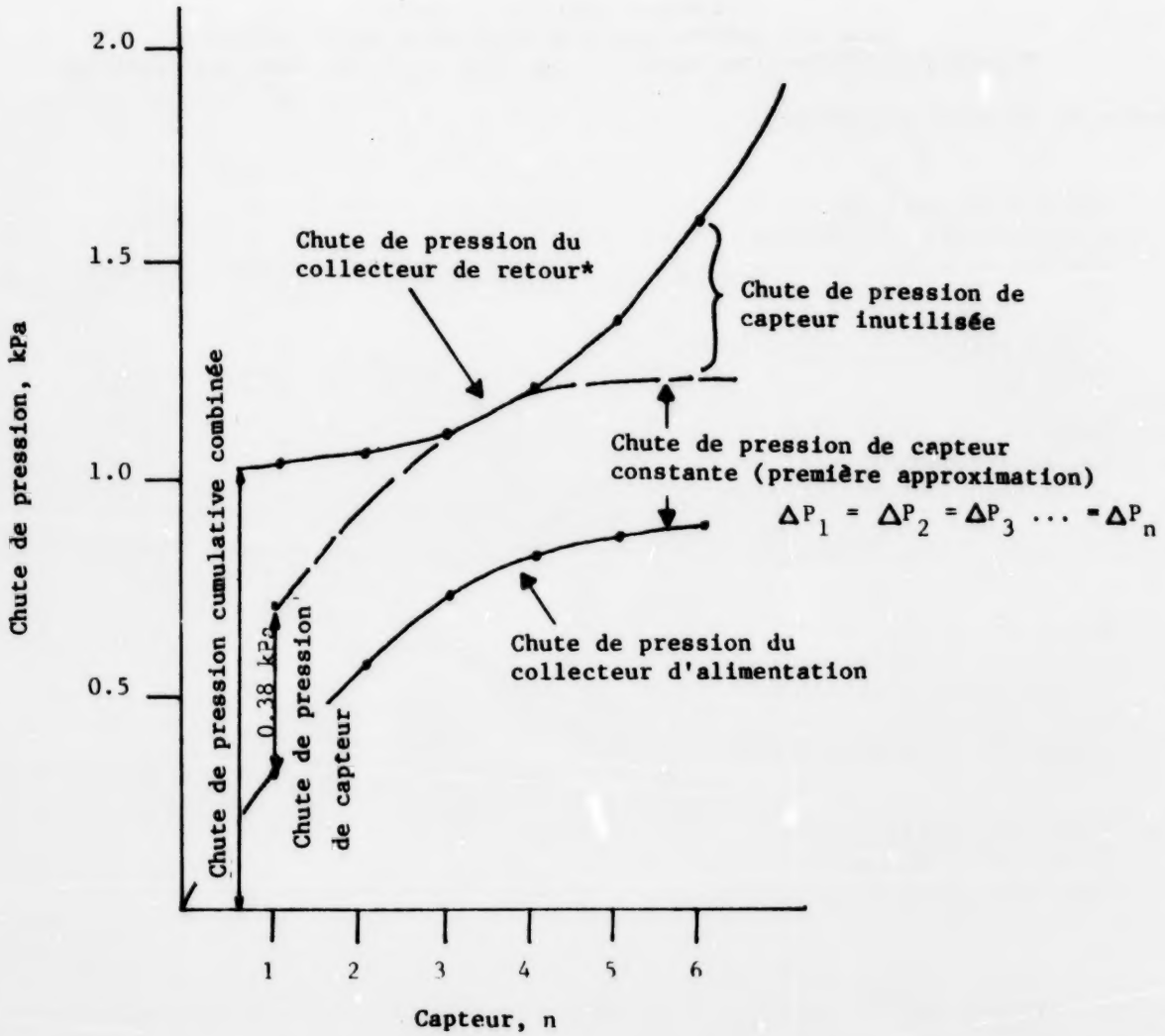
En première approximation dans le calcul de la chute de pression cumulative le long des collecteurs d'alimentation et de retour d'une batterie, on suppose que les capteurs ont même débit. On calcule la chute de pression théorique à chaque section de collecteur de la batterie au moyen d'une méthode comprenant cinq étapes (voir tableau 1).

TABLEAU 1

Chute de pression calculée dans les collecteurs d'alimentation et de retour
Première approximation basée sur un débit uniforme dans les capteurs

Numéro de section collecteur	1	2	3	4	5	6
1. Débit d'eau dans le collecteur d'alimentation (kg/s)	0.378	0.315	0.252	0.189	0.126	0.063
2. Chute de pression dans chaque section, X_j (kPa) (réf. 1)	0.345	0.248	0.166	0.097	0.048	0.014
3. Chute de pression cumulative dans le collecteur d'alimentation $X_i = \sum_{J=i}^{J=i} X_J$, (kPa)	0.345	0.593	0.759	0.856	0.904	0.918
4. Chute de pression cumulative combinée dans le collecteur d'alimentation, le capteur et le collecteur de retour (kPa) (voir fig. 2)	1.077	1.091	1.139	1.236	1.402	1.650
5. Chute de pression dans le capteur, P_n (kPa) (variable 4-variable 3)	0.732	0.498	0.380	0.380	0.498	0.732

La figure 1 montre les profils de chute de pression théorique des collecteurs d'alimentation et de retour de la batterie ainsi que la chute de pression dans les capteurs, lorsque le débit est uniforme dans les capteurs. La chute de pression inutilisée représentée dans la figure n'existe pas en pratique étant donné que le débit réel n'est pas distribué uniformément. On peut considérer que cette chute de pression inutilisée est la composante qui cause la déviation du fluide des capteurs du centre vers les capteurs externes. La différence de pression entre les collecteurs d'alimentation et de retour à chaque section de collecteur, c.-à-d. la chute de pression effective de capteur, détermine le débit dans chaque capteur.



* les chutes de pression du collecteur de retour sont identiques aux chutes de pression du collecteur d'alimentation, mais elles sont inversées et décalées d'une valeur constante

Figure 1: Profils de chutes de pression dans le cas d'une distribution uniforme du débit dans une batterie de six capteurs.

3.2 Calcul du débit de capteur réel

On détermine les débits de capteurs réels dans la batterie à l'aide d'une méthode itérative qui calcule de façon séquentielle les variables 1 à 5 du tableau 2. La chute de pression calculée (variable 5) dans une itération sert de valeur initiale (variable 1) dans l'itération suivante. Le processus se poursuit jusqu'à ce que les résultats convergent.

Dans l'exemple d'une batterie à six capteurs, les résultats convergent après deux ou trois itérations. Les débits de capteurs révisés sont présentés au tableau 2.

TABLEAU 2

Correction de chute de pression pour tenir compte des différences de débit dans les capteurs

Numéro de section de collecteur		1	2	3	4	5	6	Notes
1.	Chute de pression non corrigée dans les capteurs, ΔP_n (kPa) (réf. tableau 1)	0.732	0.498	0.380	0.380	0.498	0.732	ΔP_m = 0.537
2.	$\sqrt{\frac{\Delta P_n}{\Delta P_m}}$	1.17	0.96	0.84	0.84	0.96	1.17	total=5.94
3.	Débit massique normalisé*	1.18	0.97	0.85	0.85	0.97	1.18	total=6.00
4.	Débit massique dans le capteur (kg/s) (variable 3 x 0,063)	0.074	0.061	0.054	0.054	0.061	0.074	total=0.378
5.	Chute de pression corrigée dans les capteurs, (kPa)	0.524	0.356	0.279	0.279	0.356	0.524	

où ΔP_m = chute de pression moyenne dans les capteurs
ΔP_n = chute de pression dans le capteur "n"
n = numéro du capteur

---

* Le débit massique doit être normalisé en fonction du nombre de capteurs dans la batterie.

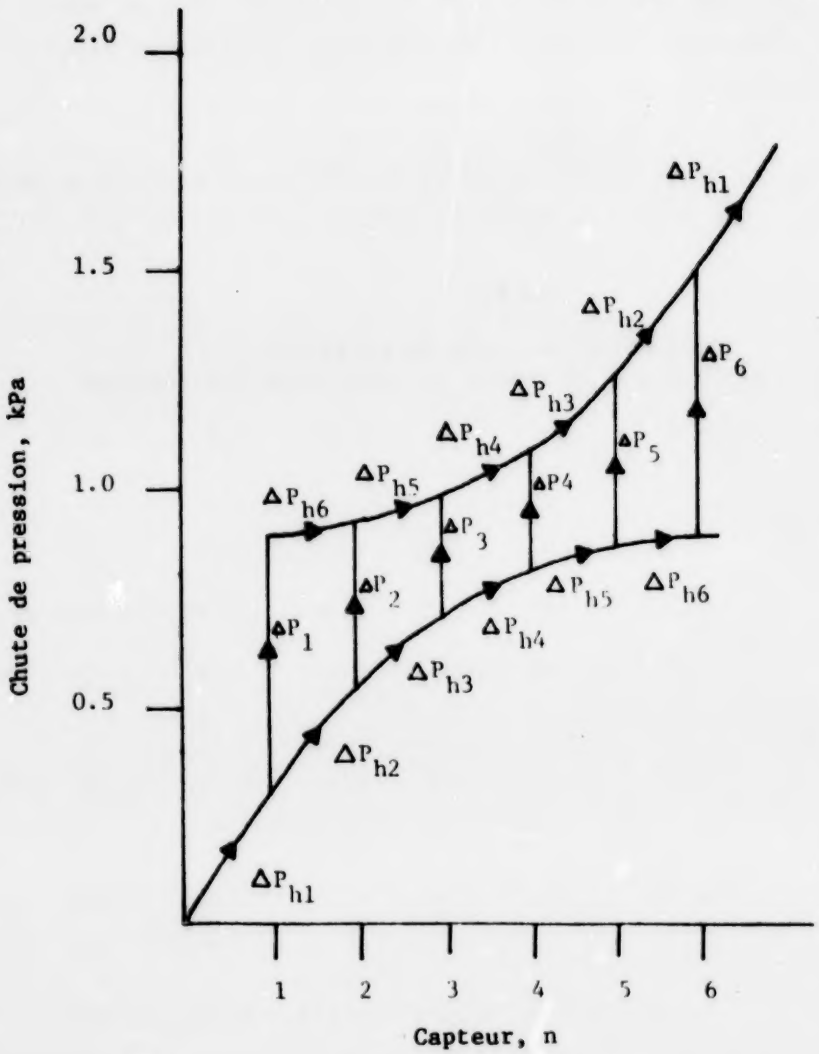


Figure 2: Profils de chutes de pression après correction pour tenir compte des différences de débit dans une batterie de six capteurs.

3.3 Profils de pression des collecteurs d'alimentation et de retour

A l'aide du débit massique dans les capteurs donné au tableau 2, on calcule le débit massique dans chaque section du collecteur. On détermine les nouvelles chutes de pression de collecteur en utilisant des tables normalisées de pression/débit. Un résumé des calculs est présenté au tableau 3.

TABLEAU 3

Baisse de pression dans le collecteur d'alimentation due à la différence de débit dans les capteurs

Numéro de section de collecteur		1	2	3	4	5	6
1.	Débit dans le collecteur d'alimentation (kg/s)	0.378	0.304	0.243	0.189	0.135	0.074
2.	Chute de pression dans le collecteur d'alimentation ΔP_n (kPa)	0.345	0.233	0.156	0.097	0.055	0.020

La chute de pression du collecteur de retour est identique à celle du collecteur d'alimentation, sauf que les profils sont inversés. La figure 2 montre les profils de pression corrigés des collecteurs d'alimentation et de retour.

3.4 Configuration d'écoulement dans les batteries avec retour direct et retour inversé

Le plus souvent, le retour est inversé, mais les collecteurs peuvent aussi être connectés de façon que le retour soit direct (voir figure 3). La figure 4 montre les profils d'écoulement dans les deux situations. Lorsque les six capteurs d'une batterie sont connectés de façon que le retour soit inversé, les deux capteurs externes prennent 40% du débit total et les quatre capteurs internes prennent les 60% qui restent. Dans une batterie de vingt capteurs, le déséquilibre d'écoulement est beaucoup plus grand: les huit capteurs externes prennent 75% du débit total et les douze capteurs du centre n'en prennent que 25%.

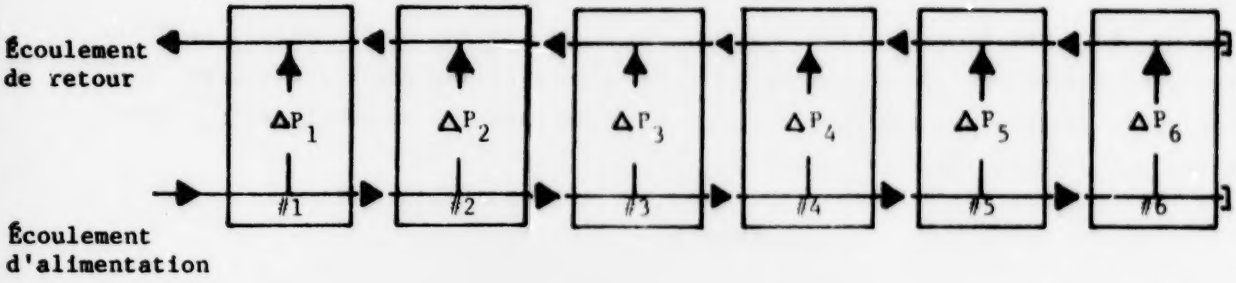


Figure 3(a): Capteurs montés en parallèle dans une batterie à retour direct

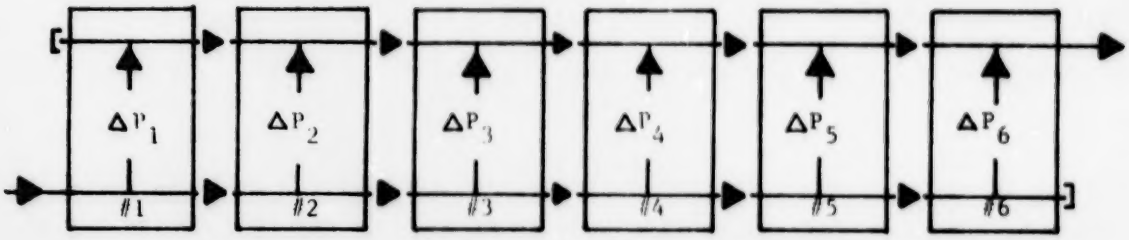


Figure 3(b): Capteurs montés en parallèle dans une batterie à retour inversé

Il n'est pas recommandé d'utiliser un montage à retour direct, car il accroît le déséquilibre d'écoulement. Dans ce type de montage, le capteur placé le plus près de la pompe solaire subit une faible chute de pression alors que le capteur placé le plus loin de la pompe subit une forte chute de pression. Dans un montage à retour inversé, les chutes de pression dans les capteurs et la configuration d'écoulement sont plus équilibrées. Les batteries sont sujettes aux déséquilibres d'écoulement, que les capteurs soient montés en série ou en parallèle.

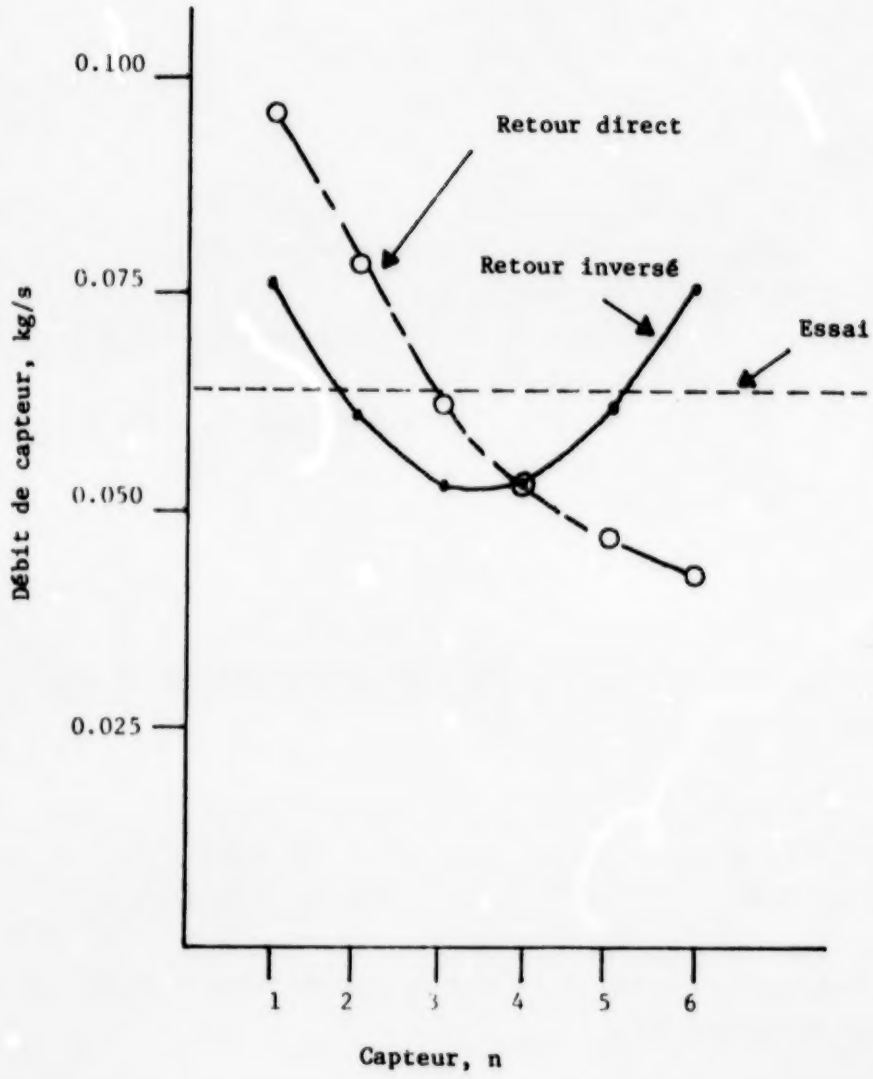


Figure 4: Configuration de l'écoulement dans une batterie de six capteurs à retour direct et retour inversé

4. FACTEUR D'EXTRACTION DE CHALEUR D'UNE BATTERIE

The gain d'énergie utile d'un capteur s'exprime comme suit (réf. 2):

$$F_r = \frac{\dot{m}C_p}{A_c U_L F'} \left[1 - \exp\left(\frac{-A_c U_L F'}{\dot{m}C_p}\right)\right]$$

$$= \frac{mC_p}{A_c U_L F'} \left[1 - F''\right]$$

où F_r = facteur d'extraction de chaleur du capteur

$\dot{m}$ = débit massique, kg/s

C_p = chaleur spécifique du fluide caloporteur, j/kg.°C

A_c = superficie du capteur, m^2

U_L = coefficient de perte d'énergie du capteur, $W/m^2.°C$

F' = rendement du capteur

F'' = $\exp \frac{(-A_c U_L F')}{mC_p}$

Les paramètres de capteurs utilisés dans l'exemple d'une batterie de six capteurs sont les suivants:

m	= 0.063 kg/s	$F_r\tau\alpha$	= 0.731
A_c	= 3.0 m^2	F_r	= 0.865
F'	= 0.888	$F_r U_L$	= 4.59 $W/m^2.°C$

où et sont respectivement le facteur de transmission et le facteur d'absorption de l'absorbeur.

On calcul les facteurs de correction d'extraction de chaleur pour chacun des six capteurs de la batterie en utilisant le débit massique réel donné au tableau 2. Un résumé des calculs est présenté au tableau 4.

TABLEAU 4

Facteurs d'extraction de chaleur, F_r, pour une batterie de six capteurs

Numéro de capteur	Débit (kg/s)	$\dot{m}C_p/A_cU_LF'$	F''	F_r
1 et 6	0.076	22.50	0.979	0.869
2 et 5	0.061	18.06	0.973	0.864
3 et 4	0.052	15.39	0.968	0.859

La moyenne des facteurs d'extraction de chaleur énumérés au tableau 4 est de 0.864.

5. RENDEMENT D'UNE BATTERIE

Une fois qu'on a calculé les débits des capteurs et qu'on connaît les facteurs d'extraction de chaleur, on peut déterminer la courbe de rendement de chacun des six capteurs de la batterie. Le guide technique n° 2 contient des graphiques à partir desquels on peut déterminer un facteur de correction Fa (réf. 5). Voici une liste de certains facteurs de correction représentatifs pour le type de capteur considéré:

Grosseur de la batterie (nombre de capteurs)	Facteur de correction (Fa)
2	.99
6	.98
10	.93
20	.85

Le rendement des capteurs est décrit par les valeurs de $F_r\tau\alpha$ et F_rU_L fournies le Centre national d'essai d'équipement solaire. On multiplie ces valeurs par le facteur de correction (Fa) pour obtenir le rendement de la batterie. Pour des batteries de grosseur moyenne, comprenant de 8 à 16 capteurs, le rendement de la batterie est d'environ 3 à 10% inférieur à celui d'un capteur.

6. CONCLUSION

Le rendement d'une batterie de capteurs est fonction du nombre de capteurs et de la configuration de l'écoulement. On peut déterminer la distribution du débit de capteur en utilisant les méthodes décrites pour une batterie de six capteurs. En se basant sur les capteurs plans ordinaires décrits dans le guide, on a déterminé les facteurs de correction pour des batteries de 2 à 20 capteurs. L'utilisation de facteurs de correction dans les simulations sur ordinateur permet d'obtenir des estimations plus précises de l'apport d'énergie solaire, particulièrement dans les gros systèmes solaires.

7. BIBLIOGRAPHIE

1. ASHRAE Handbook of Fundamentals, "Pipe Sizing", chapitre 34.13, 1981.

2. Duffie, J.A., et Beckman, W.A., "Solar Energy Thermal Processes", John Wiley and Sons, New York, 1974.

3. Hooper and Angus Associates Ltd., contrat n° 330-334-7, Bureau des programmes solaires, 1984.

4. Dunkle, R.V., et Davey, E.T., "Flow Distribution in Absorber Banks", communication présentée à la Melbourne International Solar Energy Society Conference, 1970.

5. Guide technique n° 2, "Ajustement des courbes de performance thermique en fonction des variations du débit et des caractéristiques du fluide de capteurs solaires", Bureau des programmes solaires, Travaux publics Canada, 1982.